

일개 실내수영장의 공기 중 염소 및 트리할로메탄의 노출평가 및 환기 효율 평가

박해동[†] · 박현희 · 신정아 · 김태호*

한국산업안전보건공단 산업안전보건연구원, *SK건설
(2010. 8. 25. 접수/2010. 9. 19. 수정/2010. 10. 19. 채택)

Assessment for Inhalation Exposure to Trihalomethanes (THMs) and Chlorine and Efficiency of Ventilation for an Indoor Swimming Pool

Hae Dong Park[†] · Hyun Hee Park · Jung Ah Shin · Tae Ho Kim*

Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA

*SK E&C

(Received August 25, 2010/Revised September 19, 2010/Accepted October 19, 2010)

ABSTRACT

The objectives of this study were to evaluate the air quality surrounding an indoor swimming pool, to estimate the cancer risk based on the airborne exposure to trihalomethanes (THMs), and to examine the ventilation efficiency by Computational Fluid Dynamics (CFD). Chlorine and THMs were measured poolside, and in the staff room and reception area. The indoor swimming pool was modeled using the Airpak program, with ventilation drawings and actual survey data. Temperature, flow and mean age of the air were analyzed. Levels of chlorine poolside, and in the staff room, and reception area were $203 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Chloroform was the dominant THM in all sampling sites and mean concentrations were $16.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and $0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ poolside, in the staff room and reception area, respectively. Bromodichloromethane and Dibromochloromethane levels were respectively estimated as $10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ poolside, $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in the staff room, and were not detected in the reception area. The cancer risks from inhalation exposure to THMs were estimated between 3.37×10^{-7} and 1.84×10^{-5} . A short circulation phenomenon was observed from the supply air vents to the exhaust air vents located in the ceiling. A high temperature layer was formed within one meter of the ceiling, and a low temperature layer was formed under this layer due to the low velocity and high temperature of the supply air, and the improper locations of the supply air vents and exhaust air vents. The stagnation was evident at the above adult pool and the mean age of the air was 22 minutes. Disinfection by-products in the indoor swimming pool were present in higher concentrations than in the outdoor air. In order to increase the removal of pollutants, adjustment was required of the supply air volume and the supply/exhaust position.

Keywords: indoor swimming pool, Chlorine, THMs, CFD, air quality

I. 서 론

생활수준의 향상과 건강에 대한 관심이 증가하면서 수영은 여러 가지 긍정적인 효과로 인하여 가장 권장되어지고 선호하는 활동의 한 종류이다. 그러나, 수영

장 물은 장기간 재사용되고 수영자에 의해 유기물 유입과 미생물 오염이 지속적으로 발생하므로, 오염과 수인성질병을 예방하기 위하여 지속적인 소독 및 수질관리가 필수적이다.¹⁾

여러 소독방법 중에서 염소소독은 살균력, 잔류성 및 경제성이 우수하여 현재에도 많이 사용되고 있으나, 소독과정에서 트리할로메탄(THMs, Trihalomethanes), 할로아세트산, 할로아세토나이트릴, 할로케톤, 클로라민류 등의 소독부산물 발생 가능한 것으로 알려져 있다.²⁾

[†]Corresponding author : Occupational Safety and Health Research Institute, KOSHA
Tel: 82-32-510-0808, Fax: 82-32-518-0864
E-mail : pssphd1@kosha.net

이러한 물질들은 다음과 같은 3가지 주요경로를 통하여 인체에 영향을 미치게 된다 : 1) 물의 직접 섭취에 의한 노출, 2) 휘발되거나 에어로졸화된 물질의 흡입에 의한 노출, 3) 피부접촉·흡수에 의한 노출.³⁾

소독부산물 중에서 THMs이 가장 많이 발생하고 이 중에서도 클로로포름이 가장 많은 것으로 알려져 있으며, 4종의 THMs은 모두 발암성이 의심되는 물질로 이에 대한 관심이 높아지고 있다.⁴⁾ 이 등은 국내 수영장 200개소에서 소독방법에 따른 육조수의 THMs 농도를 조사하여 염소소독방식에서 클로로포름이 가장 높았고, 브로모디클로로메탄, 디브로모클로로메탄, 브로모포름은 전해소독방식에서 가장 높은 것으로 보고하였고, 이 등은 육조수로 사용되는 수돗물의 총 THMs이 평균 25 µg/l이며, 소독방식별로는 전해소독방식 > 염소단독방식 > 오존/염소병행방식의 순으로 보고하였다.^{5,6)}

THMs의 농도는 전구물질의 농도, 염소의 사용량, 온도, pH와 관련이 있으며, 휘발성이 높아 물에서 공기중으로 휘발된다고 알려져 있다.¹⁾ Strahle 등은 실내외수영장에서 육조수, 공기 및 혈중 THMs의 농도를 비교·평가하여 호흡이 주요 노출경로임을 밝혔다.³⁾ Erdinger 등은 수영시 산소탱크의 착용유무에 따른 THMs의 농도를 평가함으로써, 호흡 경로에 의해 주로 노출되며 피부에 의한 노출은 약 1/3임을 밝혔다.⁷⁾ 김 등은 음용수 섭취로 소화기를 통한 THMs의 섭취보다 목욕 또는 샤워 시 호흡 노출이 더욱 큰 것으로 보고되고 있어 호흡에 대한 인체노출평가 연구가 필요하다고 하였다.⁸⁾ 정 등의 실내수영장 수질의 환경인식에 관한 연구에 의하면 설문조사결과 응답자의 79%가 수영장 실내공기가 신체에 영향을 미치는 것으로 인식하고 있으며, 탁한 실내공기에 의한 신체자각 증상은 조사대상자의 49.2%가 경험한 것으로 나타났다.⁹⁾

위와 같이 소독부산물에 대한 연구는 국내외에서 많이 이루어지고 있으나 주로 음용수 또는 수영장 육조수에서 평가하였으며, 실내수영장 공기질에 대한 평가는 국외에서 THMs 등에 대한 일부연구와 국내에는 조완근 등의 클로로포름을 평가한 연구 이외에는 현재까지 보고된 바가 없다.¹⁰⁾ 따라서, 본 연구는 주요 노출경로인 호흡기에 노출되는 실내수영장의 공기 중 염소 및 THMs의 농도를 측정하고 현장에서 환기시물레이션을 실시하였다. 공기 중 THMs의 호흡기노출위험을 평가하여 발암위험성을 개략적으로 추정하였다. 또한 환기 효율을 평가하여 실내수영장내 공기질을 쾌적하게 유지관리하기 위한 기초자료를 제공하고자 하였다.

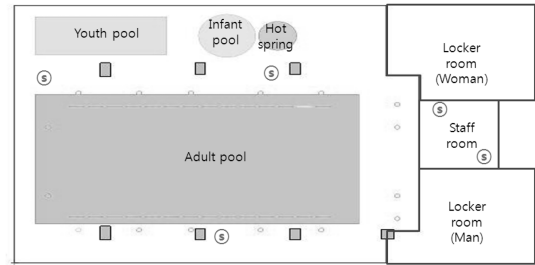


Fig. 1. Floor sectional view of indoor swimming pool showing sampling site (S).

II. 연구방법

1. 연구대상

수영장 환경관리를 위하여 공기질 평가를 의뢰한 서울소재의 실내수영장 1개소를 평가대상으로 하였으며, 성인풀(25 m, 6개 레인), 청소년풀, 유아풀, 온탕 등으로 구성되어 있고, 탈의실(남/여)과 강사실이 연결되어 있으며, 지하 1층에 위치하고 있었다. 수영장의 육조수는 연 1~2회 전체를 교환하며, 물 교환시점으로부터 7개월 경과 시점에 평가하였다. 육조수는 부유물을 응집한 후 여과장치(Sand filter)를 이용하여 매일 6회 걸러주며, 수질관리에 일평균 5% 차아염소산나트륨 20 l, 35% 염산 1.3 l, 부유물 응집제 0.5~1 l를 사용하고 있었다.

2. 공기질 평가

실내공기질을 평가하기 위하여 측정대상물질은 눈 자극영향이 있는 염소와 소독부산물로 가장 많이 발생하는 것으로 알려져 있는 THMs이었다. 2009년 12월중 이들 동안 반복하여 측정하였으며, 각 일자별로 측정장소는 수영장내 3~6개 지점, 강사실 3~4개 지점, 접수대 2~3개 지점, 외기 1~2개 지점에서 측정하였다. 수영장 내에서는 성인풀을 중심으로 환기가 불량하거나 온탕 등이 근접하여 오염이 높을 것으로 판단되는 지점을 선정하였으며, 측정높이는 바닥으로부터 약 50 cm 위치에서 지역시료로서 채취하였다. 강사실과 접수대에서는 앉았을 때의 호흡영역이 위치하는 높이에서 지역시료로 측정하였으며, 외기는 건물 외부의 1층에 위치하고 있는 환기설비의 급기구 부근에서 측정하여 실내평가결과와 비교하였다.

1) 염소(Cl₂)

염소의 측정은 National Institute for Occupational Safety and Health(NIOSH)의 Manual of analytical methods(NMAM) #6011¹¹⁾에 따랐으며, 주요내용은 다

Table 1. Analytical conditions to quantify airborne chlorine and THMs

Compound	Condition
Cl ₂	Injection volume : 25 µl
	Column : Dionex IonPac AS9
	Mobile phase : 0.25 mM NaHCO ₃ / 4 mM Na ₂ CO ₃ / 0.78 mM p-cyanophenol
THMs (Trihalo- methanes)	Column : HP-5 (0.25 mm×30 m×1 µm)
	Injector : Injection volume 1 µl, Split ratio 10:1
	Constant flow 0.8 ml/min
	Oven : Initial 40°C(10 min) rate 5°C/min 80°C(1 min) rate 10°C/min 200°C(3 min)

음과 같다. 채취매체는 0.5 µm Polytetrafluoroethylene (PTFE)을 0.45 µm 은막여과지(25 mm, 225-9006, SKC, USA) 앞에 장착하였고, 0.3 LPM으로 6시간동안 Fig. 1에서 나타낸 지역에서 채취하였다. 암실에서 은막 여과지를 용기에 옮기고 6 mM Na₂S₂O₃ 3 m/를 첨가하여 10분 이상 흔들어서 탈착한 후, 탈이온수 7 m/를 넣어 시료로 사용하였다. KCl 0.21 g을 탈이온수에 녹이고 희석하여 검량선을 작성하였다. 분석은 이온크로마토그래피-전도도검출기(IC/Conductivity detector, DX-600/ED50, Dionex, USA)를 이용하였으며 분석조건은 Table 1과 같다. SPSS(PASW Version 18.0)를 이용하여 측정일간 평균을 비교하기 위하여 T-검정을 실시하였다.

2) THMs

THMs의 측정은 NMAM #1003¹²⁾에 따랐으며, 주요 내용은 다음과 같다.

활성탄흡착관(100 mg/50 mg, 226-01, SKC, USA)을 이용하여 0.2 LPM으로 6시간동안 지역시료로 채취하였으며, 이황화탄소 1 m/로 추출한 후 가스크로마토그래피-질량분석기(GC/MSD, 6890-5973i, Hewlett packard, USA)를 이용하여 분석하였다. SCAN 모드에서 정성분석을 실시한 후, SIM 모드에서 정량분석을 하였으며 분석조건은 Table 1과 같다.

3. 발암성평가

본 조사에서 측정된 공기 중 THMs의 농도에 근거하여 발암위험 가능성을 추정하였다. 추정에 사용된 모델은 아래와 같으며, 미국 환경청(US EPA)의 발암잠재력(carcinogenic slope factor)을 이용하였고 인체의 체중 및 평균연령 등은 한국 노출계수 핸드북에 따랐다.^{19,27,28)}

$$\text{Cancer risk} = \text{CDI}_{\text{inhalation}} \times \text{SF}_{\text{inhalation}}$$

$$\text{CDI}_{\text{inhalation}} = (\text{CA} \times \text{IR} \times \text{ET} \times \text{EF} \times \text{ED}) / (\text{BW} \times \text{AT})$$

CDI(chronic daily intake), SF(slope factor), CA (contaminant concentration in air, mg/m³), IR(inhalation rate, 1 m³/hr), ET(exposure time, 1 hr/day), EF(exposure frequency, 3 days/week × 52 weeks/year = 156 days/year), ED(exposure duration, 30 years), BW(body weight, male 69.2 kg, female 56.4 kg), AT(average time, 78.6 years × 365 days/year)

4. 환기평가

환기평가를 위하여 환기설비의 도면을 확인하고, 가동상태 확인 및 실측하였다. 외부공기 100%를 Air Handling Unit(AHU)를 통해 흡입하여 천장에 설치된 16개의 직경 0.4 m 라운드형 디퓨저를 통해 급기되며, 천장에 성인폴 길이방향 좌우에 설치되어 있는 28개의 직사각형 Slot 디퓨저(가로 1.2 m, 세로 0.05 m)를 통해 배기용 팬에 의해 강제배기 되고 있었다. 급기구의 유량은 공조유량 측정용 열선풍속계인 AccuBalance Plus Air Capture Hood(8373, TSI, USA)를 사용하여 실측하였으며, 실내공기질 측정용 습도측정기(8672, TSI, USA)를 이용하여 온도, 습도 및 이산화탄소 농도를 측정하였다.

환기시뮬레이션 대상은 가로 31.9 m, 세로 27 m, 높이 3.58 m로 전체 체적이 3,083 m³였다. 전산유체역학 프로그램은 Airpak(Ver 3.0, Fluent Co., USA)을 이용하였고, 수영장 설계도면을 활용하여 도식화하고, 급기구와 배기구 및 출입문은 ‘Fan’을 이용하였고 ‘Recirculation Opening’을 사용하여 급배기 평형을 유지하도록 설계하였다. 수영장의 특성상 대공간이며 수분증발 및 고온급기의 영향으로 공기유동이 강제대류뿐만 아니라 자연대류의 영향이 예측되어 해석 시 온도 및 습도조건을 해석하고, 자연대류 조건(중력장)을 함께 해석하였다. 초기 조건은 온도 28°C, 습도 70%로 설정하였고, Hexa unstructured mesh 방법을 이용하여 총 체적격자는 약 4,000,000개로 구성하고 각각의 조건에 따라 평균 3,000회 반복계산 하였다. 운동량 해석을 위해 난류유동의 해석, 복사 열전달 및 화학반응을 위한 방정식을 포함하였으며, 부력의 영향 계산에 두 가지 모델을 적용하여 계산하였고(Mass conservation & Momentum conservation, Spalart-Allmaras & Standard k-epsilon), 복사모델로는 Surface to surface Model을 적용하였다. 작업장 내 온도분포, 기류유속 및 공기나이(Mean Age of air)를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 공기 질 평가

1) 공기 중 염소농도 평가

수영장내 염소의 평균농도는 T-검정결과 평가일 간에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났으며(p=0.265), 염소의 이틀 평균농도는 수영장내에서 평균 203 µg/m³로 가장 높았으며, 최고 농도는 293 µg/m³로 평가되었다.

강사실과 접수대의 평가결과는 검출한계에 가까운 낮은 농도였으며, 강사실에서는 최고 25 µg/m³이 검출되었고, 접수대에서는 최고 19 µg/m³이 검출되었으며, 외기에서는 이틀 측정에서 모두 검출되지 않았다. 강사실은 수영장과 유리문으로 구분되어 있으며 강사들의 출입으로 수시로 개방되고 수영복 등 욕조수에 젖은 물품들이 일부 보관되어 있었으나 염소의 농도는 수영장의 약 3% 미만으로 낮게 평가되었다. 접수대는 수영장으로 부터 약 10 m 떨어진 곳에 위치하고 있었으나, 평균농도가 강사실보다 높게 나타났다. 이는 접수대는 2개 시료 중 1개 시료가 미검출이어서 나머지 한 개 시료에 의해 평균이 높아진 반면, 강사실은 7개의 시료 중 4개 시료가 미검출 되었으며 3개 시료에서 미량 검출되어 평균값은 낮아진 것으로 생각된다.

정 등이 업무상 질병심의를 위해 실시한 실내수영장 염소노출 평가에 의하면, 수영장내의 평균농도는 142 µg/m³(범위: 81~194 µg/m³), 접수대 근무자의 개인시료의 시간가중평균농도는 154 µg/m³이었으며, 락스 청소 시 접수대의 단시간 측정값은 1,923 µg/m³로 평가되었다.¹³⁾ 접수대 근무자의 노출수준이 수영장내의 수준과 유사한 이유는 측정대상 수영장의 구조상 수영장에서 발생한 기류가 접수대 방향으로 흐르고 있었던 것으로 밝혀져 있었다. 본 평가결과는 정지연 등의 평가결과에 비해 수영장내 농도는 약간 높은 수준이며 접수대는 매우 낮은 농도였는데, 이것은 본 평가대상인 수영장에서

직접적인 기류가 형성되어 접수대로 흐르는 구조가 아닌 때문으로 판단된다. Drobnic 등에 의하면, 스페인의 4개 실내수영장에서 욕조수위의 10 cm 이내에서 측정 한 공기 중 염소농도는 0.42 ± 0.24 mg/m³로 보고하여 본 연구결과와 약 2배 수준이었다.¹⁷⁾

ACGIH TLVs Documentaion¹⁴⁾에 의하면, 염소는 8시간 노출시 눈과 점막자극을 최소화 할 수 있는 농도로서 노출기준(TWA)이 0.5 ppm(1.5 mg/m³)으로 설정되었는데, 모든 측정결과는 8시간 가중평균 노출기준(TWA)과 비교시 20% 이하로 평가되었다. 스페인의 Santa Marina 등의 연구에 의하면 강렬한 활동을 하는 수영자를 보호하기 위한 참고기준으로 제안된 공기 중 총염소의 농도는 0.5 mg/m³로 보고된 바 있으며,¹⁵⁾ 본 평가결과는 이 참고기준의 약 40% 수준이었다.

수영과 같이 극심한 산소소모량이 요구되는 운동의 경우 휴식시 보다 10~12배, 일반작업보다 6~7배 정도 많은 호흡량이 필요하다.¹³⁾ 일반작업시 노출기준농도에서 호흡률 18 l/min로 8시간동안 노출되는 경우 염소흡입량은 13 mg이며, 본 평가의 평균농도를 기준으로 일반작업의 7배의 호흡률로 수영강습자 1시간, 수영강사 6시간 노출을 가정하는 경우 염소흡입량은 1.7 mg과 10.2 mg이다. 공기 중 염소농도는 노출기준의 20% 미만이나, 호흡률을 고려한 염소흡입량은 노출기준 수준 농도에서 8시간 작업시 염소흡입량에 비해서 수영강습자는 13% 수준이나 수영강사의 경우 78% 수준이었다. 본 평가는 6시간동안 지역시료로서 측정된 값이며, 수영장 이용자 및 강사 등의 경우 수영장내에서 머무는 시간이 1~6시간으로 매우 다양하며, 물속에서 직접적인 피부접촉이 일어나는 등 일반 작업환경과는 차이가 많아서 노출기준을 직접적으로 적용하기에는 한계가 있다. 욕조수의 직접흡입 및 피부접촉, 운동강도에 따른 호흡량 등을 고려하여 욕조수 중 염소농도 및 실내공기 중 염소농도에 대한 건강영향 연구가 향후 수

Table 2. Airborne chlorine concentrations by sampling sites (unit : µg/m³)

Sampling Site	1st day		2nd day		Total	
	N	Mean ± S.D. (Range)	N	Mean ± S.D. (Range)	N	Mean ± S.D. (Range)
Poolside	3	227 ± 60 (176~293)	6	191 ± 33 (140~228)	9	203 ± 44 (140~293)
Staff room	3	10 ± 13 (N.D.~25)	4	N.D.	7	5 ± 9 (N.D.~25)
Reception area	-	-	2	10 ± 13 (N.D.~19)	2	10 ± 13 (N.D.~19)
Outdoor	1	N.D.	1	N.D.	2	N.D.

N: Number of sample, S.D.: Standard deviation, N.D.: Not detected (0.15 µg/sample).

Table 3. Airborne THMs concentrations by sampling sites(unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Sampling Site	N		CHCl_3	CHBrCl_2	CHBr_2Cl	CHBr_3	Total THMs
Poolside	9	Mean \pm S.D.	78.6 ± 12.6	10.3 ± 1.3	1.7 ± 0.3	N.D.	91.6 ± 13.4
		(Range)	(74.9~118.1)	(8.0~11.8)	(1.4~2.0)		(79.3~121.5)
Staff room	7	Mean \pm S.D.	2.7 ± 0.4	1.3 ± 1.8	0.1 ± 0.1	N.D.	4.0 ± 1.8
		(Range)	(2.6~3.8)	(0.6~5.4)	(N.D.~0.1)		(3.1~8.0)
Reception area	4	Mean \pm S.D.	0.3 ± 0.1	N.D.	N.D.	N.D.	0.3 ± 0.1
		(Range)	(0.3~0.4)				(0.3~0.4)
Outdoor	2	Mean \pm S.D.	0.2 ± 0.1	N.D.	N.D.	N.D.	0.2 ± 0.1
		(Range)	(0.1~0.2)				(0.1~0.2)

N: Number of sample, S.D.: Standard deviation, CHCl_3 : Chloroform, CHBrCl_2 : Bromodichloromethane, CHBr_2Cl : Dibromochloromethane, CHBr_3 : Bromoform, THMs: Trihalomethanes, N.D.: Not detected (CHBrCl_2 0.013 $\mu\text{g}/\text{sample}$, CHBr_2Cl 0.002 $\mu\text{g}/\text{sample}$, CHBr_3 0.014 $\mu\text{g}/\text{sample}$).

행되어야 할 것으로 생각된다.

2) 공기 중 THMs 농도 평가

THMs 중에서 클로로포름의 농도가 가장 높았고, 브로모디클로로메탄, 디브로모클로로메탄의 순이었으며, 브로모포름은 모든 측정지점에서 검출되지 않았다.

클로로포름의 수영장내의 평균농도는 $78.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 노출기준($50 \text{ mg}/\text{m}^3$)의 0.16%이었으며, 최고농도는 $118.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 노출기준의 0.22%로 나타났다. 본 평가 결과는 조 등(1994, 한국)이 염소 및 오존소독을 병행하는 2개 실내수영장에서 평가한 28.0, 33.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ¹⁰⁾에 비해서 약 2배 높은 수준이었으며 이는 소독방식에 따른 염소사용량의 차이 때문으로 생각된다. 본 평가결과는 Stottmeister 등(1998, 1999, 독일)의 39, 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Jovanovic 등(1995, 독일)의 36, 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Thariat 등(2009, 프랑스)의 17.5~81.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해서는 높은 수준이었으나, Armstrong 등(1986, 미국)의 <0.1~260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Aggazzotti 등(1993, 1995, 1998, 이탈리아)의 140, 214, 169 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Levesque 등(1994, 캐나다)의 연구에서 597~1630 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 등에 비해서는 낮은 수준이었다.^{3,16)}

브로모디클로로메탄은 수영장과 강사실에서만 검출되었고, 평균 농도는 $10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평가되었으며, 노출기준이 설정되어 있지 않아 기준치와의 비교는 불가능하다. 국내에서 연구된 결과는 없으며 국외 연구에는, Aggazzotti 등의 17.4, 19.5, 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Jovanovic 등의 9.2, 5.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Stottmeister 등의 4.9, 4.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Armstrong 등의 <0.1~10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 등이 보고되었으며,³⁾ 본 평가결과와 유사한 농도수준이었다.

디브로모클로로메탄도 수영장과 강사실에서만 검출되었고, 평균 농도는 $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평가되었으

며, 노출기준이 설정되어 있지 않으며 현재까지 국내연구 결과는 없었다. 국외의 연구에는 Jovanovic 등의 3.8, 1.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Stottmeister 등의 0.9, 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Armstrong 등의 <0.1~5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 결과가 본 연구결과와 비슷한 수준이었으며, Aggazzotti 등의 13.3, 6.6, 11.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 결과는 본 연구결과보다 높은 수준이었다.³⁾

브로모포름은 본 측정에서는 모두 검출이 되지 않았으며, 국외 연구는 Aggazzotti 등의 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Stottmeister 등의 0.1, 0.08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Armstrong 등의 <0.1~14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 등이 보고된 바 있다.³⁾

총 THMs의 평균농도는 수영장내 $91.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 강사실 $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 접수대 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되어 외기의 $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해서 각각 460배, 20배, 1.5배 높은 것으로 평가되었다. 강사실의 총 THMs 농도는 수영장의 약 4% 수준으로 염소와 같이 매우 낮았으며, 이는 수영장내에 약한 음압이 걸려있어 잦은 출입에도 오염물질의 강사실 방향 이동이 적었던 것으로 생각된다. Fantuzzi 등의 연구¹⁾에서 이탈리아의 5개 실내수영장을 대상으로 총 THMs의 농도를 평가한 결과, 수영장내 공기 중에서 평균농도는 $58.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 접수대 $26.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평가한 것에 비해서 본 연구의 수영장내 농도는 높은 수준이었으나, 접수대의 농도는 매우 낮은 것으로 평가되었으며, 이는 수영장과 접수대의 거리 등 배치환경이 서로 다르기 때문으로 생각된다.

이상의 국내·외 연구결과와 비교시 클로로포름의 농도는 각 연구별로 차이가 많았으며, 각 연구내에서도 범위가 넓은 것으로 나타났으나, 다른 물질들은 농도차이가 적었다. 각 연구에서 수영장 측정지 환경에 대한 자세한 기술이 없어 농도차이를 명확하게 설명하기는 어려웠다. 소독을 위한 욕조수내 유리잔류염소의 농도 기준은 독일(0.3~0.6 mg/l), 이탈리아(0.6~1.2 mg/l), 영

국(1~2 mg/l), 미국(1~3 mg/l)으로 국가별로 다르게 설정되어 있으며¹⁸⁾ 우리나라는 염소소독방식의 경우 0.4~1 mg/l¹⁹⁾으로 설정되어 있다. 위의 연구결과 중 독일의 공기 중 THMs의 농도가 다른 연구에 비하여 낮은 것은 잔류염소농도 기준이 낮아 염소사용량이 적은 원인이 있는 것으로 생각되나, THMs의 생성과 확산 및 정제에는 여러 환경변수에 의해 영향을 받을 수 있어 단정하기는 어렵다. 본 연구의 경우 평가시기가 온도가 낮고 이용인원이 비교적 적은 겨울철이고, 환기시스템에서 공기공급은 전량 신선한 외기를 공급하고 배기되는 공기를 재사용 하지 않는 특성이 있었다. 이러한 특성이 농도수준에 영향을 주었을 것으로 생각되나, 환경변수가 농도에 미치는 영향의 정도를 파악하기 위해서는 이용객수, 계절, 환기방식, 소독방식 등 다양한 환경에서 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

2. THMs의 노출로 인한 발암성평가

최근 인체 발암의심물질인 THMs에 노출될 수 있는 다양한 분야에서 위험성평가기법 적용을 시도하고 있다. Lee 등과 Wang 등은 음용수 섭취과정에서 노출될 수 있는 THMs의 발암위험성에 대해 보고하였으며,^{19,20)} Panyakapo 등은 음용수와 수영장의 THMs에 의한 발암위험성을 평가하여 수영에 의한 영향이 94%라고 보고하였다.²¹⁾ Chowdhury 등은 샤워 및 목욕시 노출되는 THMs에 의한 발암위험성으로 4.3×10^{-6} ~ 7.6×10^{-6} 으로 보고하였다.²²⁾

본 연구의 수영장내 THMs 평균농도를 적용하여 발암위험성평가를 한 결과 Table 4와 같이 나타났다. 이 등의 연구에 의하면, 수영장의 소독방식별 발암위험성 평가에서 염소소독이 오존병행방식보다 높았고, 노출경로별로는 호흡에 의한 위험이 접촉 또는 섭취에 의한 위험보다 높았으며, 염소소독방식에서 호흡노출 리스크로 남성 1.15×10^{-3} , 여성 1.36×10^{-3} 으로 보고하였다.²³⁾ 그러나, 이 연구는 THMs의 농도를 욕조수에서만 평가한 후 공기 중 농도는 추정하여 적용한 한계점이 있

다. 이에 비해 본 연구에서는 공기 중 농도를 직접 적용하였으며, 전체 발암위험에서 차지하는 비중은 클로로포름(89%)이 가장 높았으며, 브로모디클로로포름(9%), 디브로모클로로포름(2%)의 순이었다. 클로로포름은 미국 환경청이 제시한 수용할 수 있는 위험수준(acceptable risk level)인 10^{-6} 보다 15~18배 높았으나, 브로모디클로로포름과 디브로모클로로포름에 의한 위험수준은 10^{-6} 보다 낮았다. 클로로포름을 제외한 3개 물질의 발암잠재력은 호흡에 의한 계수가 없어 섭취에 의한 발암잠재력을 적용한 한계가 있으며, 노출빈도(주 3회)와 노출지속기간(30년)을 가정하였으므로 실제 노출정도에 따라서 차이가 있을 수 있고, 개인의 영양상태, 건강상태, 생활습관, 유전적 특성 등에 따라 매우 큰 변이가 있을 수 있다.

3. 환기평가

개별 급기구별 실측 급기유량은 6.3~8.7 m³/min였고, 급기온도는 50~60°C, 습도는 약 20%였다. 전체 급기유량은 119 m³/min으로 설계용량인 366 m³/min의 32%에 불과하였다. 이는 급기팬의 마모, 급기덕트 등에서 발생하는 압력손실 때문으로 추측된다.

수영장내의 이산화탄소 농도는 정이 대전지역 여객대합실에서 평가한 연평균 농도 504 ppm과 박 등이 경기지역 141개소의 다중이용시설에서 측정한 평균농도인 679 ppm에 비해서 높은 수준이었으나, 실내공기질 기준인 1,000 ppm보다는 낮았다.^{24,25)} 측정시간 동안 실내 평균인원은 50명이었고 연소기기 사용 등 이산화탄소 오염요소가 없으며, 실내채적 및 환기설비 용량을 고려했을 때 실내외 비율(Indoor/Outdoor ratio)이 1.8로 평가된 것은 환기가 원활하지 못한 때문으로 판단되었다.

실내수영장의 특성상 대공간이며, 연막을 발생하여 기류를 가시화 하거나 추적가스를 이용하는 방법, 급배기구 유속 및 송풍기의 효율 평가로는 수영장 내부의 공기 정체현상을 평가하기 어려웠으며 이에 따라 시뮬레이션기법을 활용하게 되었다. 시뮬레이션은 설

Table 4. Cancer risk assessment of THMs based on the inhalation exposure assessed at indoor swimming pool

Compound	SF _{inhalation}	Male	Female
CHCl ₃	8.1×10^{-2}	1.50×10^{-5}	1.84×10^{-5}
CHBrCl ₂	* 6.2×10^{-2}	1.51×10^{-6}	1.85×10^{-6}
CHBr ₂ Cl	* 8.4×10^{-2}	3.37×10^{-7}	4.13×10^{-7}
CHBr ₃	* 7.9×10^{-3}	-	-

SF: slope factor, *: oral exposure slope factor were adopted for inhalation exposure.

Table 5. Mean levels of temperature, R.H. and CO₂ at indoor swimming pool

Sampling Site	Temp. (°C)	R.H. (%)	CO ₂ (ppm)
Poolside	29.4 ± 1.4	77 ± 6	855 ± 139
Staff room	27.3 ± 0.7	35 ± 2	778 ± 57
Reception area	20.9 ± 2.6	19 ± 5	669 ± 65
Outdoor	-0.6 ± 0.6	22 ± 2	465 ± 33

Temp.: Temperature, R.H.: relative humidity, CO₂: carbon dioxide.

계도면과 실측을 병행하여 제어체적 및 경계조건을 설정하였다. 다양한 경계조건에 따른 시뮬레이션을 실시하여 수영장내에서 실측한 온·습도 수준과 시뮬레이션을 비교하여 가장 유사한 결과를 선정하여 환기상태를 평가하였다.

수영장 내 온도분포를 살펴보면, 급기구 주변에서는 급기온도의 영향으로 40°C 이상의 온도 분포를 보이거나 이러한 공기층은 상부로부터 약 1m 높이에서 바닥으로 내려오지 못하고 다시 배기구를 통해 배출되고 있었다. 따라서, 상부 1m 이하에서는 28-32°C의 온도분포를 나타내면서 온도에 따른 두 개의 층이 형성되었다. 속도분포를 살펴보면, 온도와 마찬가지로 급기구에서 형성된 최대 0.8 m/sec의 기류가 약 1m 상부에서 바닥면으로 내려가지 못하는 현상이 발생하며 일부 기류만이 벽면을 타고 바닥으로 흘러가는 양상을 보였고, 바닥면에서는 약 0.1 m/sec의 유속을 나타내었다. 공기나이 분포를 살펴보면, 온도편차 및 벽면으로 일부 확산되는 기류의 특성으로 수영장 중앙인 성인풀의 상부에서 공기나이가 가장 커서 공기정체 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 수영장 내부 전체 평균 공기나이는 약 1,318초로 시간당 약 2.7회 환기가 이루어졌으며 성인풀 상부의 경우 약 1,423초로 시간당 약 2.5회의 공기순환이 이루어지고 있었다.

미국 ASHRAE(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)의 2007

년 Handbook에 따르면 수영장에서의 시간당 공기교환 횟수를 수영장의 용도에 따라 4-8회로 운영토록 규정하고 있는 것에 비해서 최소기준보다 적었다. 또한 ANSI/ASHRAE Standard 62, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality에 따르면 실내수영장의 경우 2.4 // m²·min의 신선한 공기를 공급하도록 규정하고 있는데, 급기유량은 119 m³/min으로 기준치인 129 m³/min에 비해 8% 부족하였다. 또한, 현재 수영장 내부에 설치된 급기구와 배기구는 모두 천장에 설치되어 있어 바닥으로 내려오지 못한 급기된 뜨거운 공기가 배기구를 통해 바로 배출되는 Short-circulation 현상이 발생하고 있었다. 특히, 시뮬레이션 결과 성인풀 상부의 공기정체가 가장 심한 것으로 나타났다. 실내수영장을 대상으로 환기시뮬레이션 평가한 경우가 없어 본 연구와 비교·평가하기는 어려웠으며, 수영장과 같은 실내공간에서 시뮬레이션을 통하여 환기상태를 평가하고 개선 방안을 도출하는 연구가 필요한 것으로 생각된다.

본 연구는 겨울철 한 개 실내수영장의 공기질과 환기상태를 평가하였다. 동일 수영장이라 하더라도 여름철 및 봄·가을철에 급기온도 및 급기유량이 다르게 설정되어 운영되거나 다른 소독방식에 의해 운영될 경우에는 본 평가결과와는 다를 것으로 생각된다. 적은 시료수로 인해 현 평가결과를 일반적인 수영장의 수준으로 평가할 수는 없으며, 계절적인 제한점, 이용인원에 따른 변이, 소독방식에 따른 염소사용량의 차이 등에 따

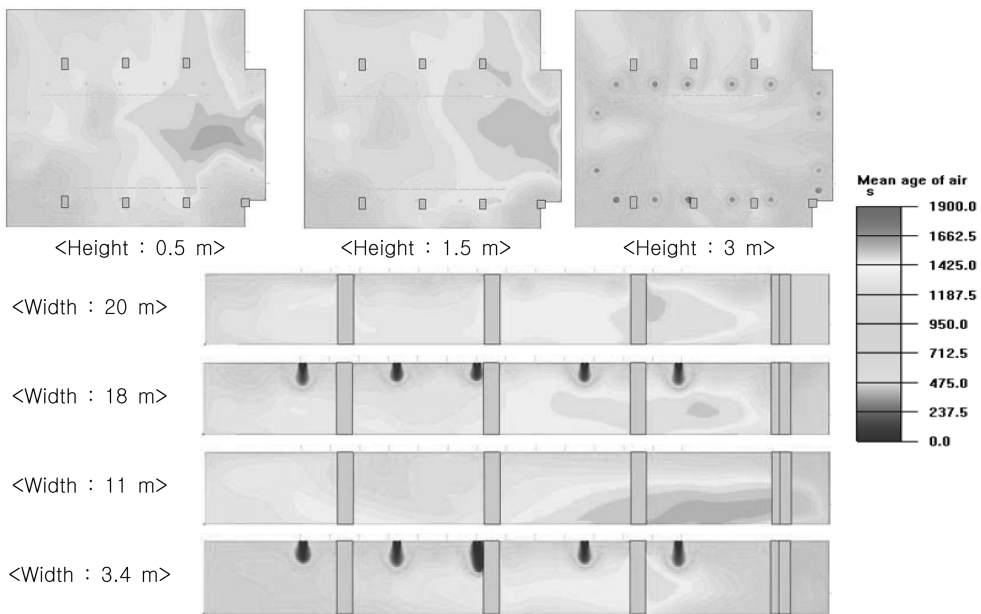


Fig. 2. Mean age of air in indoor swimming pool, Height : view from floor, Width : view from left side.

라 다양하고 깊이 있는 연구가 필요할 것으로 생각된다. 특히, 실내 오염물질 농도에 큰 영향을 미치는 환기방식에 따른 차이도 고려하여야 할 것으로 생각되며, 본 수영장은 재순환이 없는 환기설비의 특성이 있었다. 수질에 대한 평가를 실시하지 않아 오염물질의 인체영향을 평가하는 위험성평가에서 3가지 노출경로 중 호흡에 의한 영향만을 평가할 수 있었으며, 섭취 및 접촉에 의한 영향 평가를 할 수 없어 인체영향에 대한 총량을 평가하지 못하였다. 수영강사, 관리자, 수강생 등 다양한 수영장 출입자의 활동에 대한 고찰이 부족하였으며, 실제 수영장내에서 머무르는 시간과 운동강도에 대한 조사 등이 필요한 것으로 생각된다. 다양한 실내수영장에서 공기질과 수질 등 환경을 평가하고, 설문조사를 통한 수영강사와 수강생 등의 건강영향에 대한 조사가 이루어진다면 건강증진을 위한 수영장 환경조성에 도움이 될 것으로 생각된다. 이와 같은 많은 제한점에도 불구하고, 국외에서 활발히 연구되고 있지만 국내에서는 아직 연구가 부족한 실내수영장에서 공기질을 평가한 점과 시뮬레이션 기법을 도입하여 환기상태를 평가한 점은 좋은 예가 될 수 있을 것으로 생각된다.

IV. 결 론

실내수영장의 공기질 평가와 환기시뮬레이션 결과 주요 내용은 다음과 같다.

염소의 평균농도는 수영장 $203 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 강사실 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 접수대 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평가되었으며 노출기준인 $1.5 \text{mg}/\text{m}^3$ 의 20% 미만이었으나, 호흡률을 고려할 때는 수영강사의 경우 일반작업환경에서 노출기준에 노출되는 총 염소흡입량의 약 78%로 나타났다. THMs의 농도분포는 클로로포름 > 브로모디클로로메탄 > 디브로모클로로메탄 > 브로모포름의 순이었고, 수영장내 평균농도는 클로로포름 $78.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 브로모디클로로메탄 $10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 디브로모클로로메탄 $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 브로모포름은 검출되지 않았다. 클로로포름 흡입에 의한 발암위험성을 평가한 결과 미국 환경청이 제시한 수용할 수 있는 위험수준인 10^{-6} 보다 15~18배 높았다. 수영장내 환기설비의 급기유량 실측에서 총 급기유량이 설계유량의 약 32% 만이 유입되었고, 시간당 공기횡수가 2.7회로 미국 ASHRAE의 최소권고기준인 4회에 비해 미흡하였다. 고온의 공기가 천정에서 급기되고 더운 공기가 바닥까지 내려오지 못해 공기층화현상이 발생하며, 급·배기구가 모두 근접하여 천정에 설치되어 있어 Short-circulation 현상이 발생하며, 성인풀 상부의 공기정체가

가장 심한 것으로 나타났다.

위와 같이 염소소독에 의해 실내수영장에서는 소독부산물 발생하여 외기에 비하여 높은 농도로 존재하고 있음을 확인하였고, 현장조사와 시뮬레이션을 통하여 환기량이 부족하고 환기가 원활하지 않은 정체구역이 있음을 파악하였다. 현 수영장의 경우 급기유량의 보완, 급·배기구의 위치 조정 등의 개선을 통해서 실내 환경을 더욱 쾌적하게 유지할 수 있을 것으로 생각된다. 소독부산물에 만성적으로 노출되는 수영선수들은 호흡기 계통에 나쁜 영향을 받을 수 있으나, 레크레이션 목적으로 하는 수영자의 노출에 대한 영향은 아직 명확하지 않은 상황이다.²⁹⁾ 향후, 수영장 내에서도 관리자, 강사 및 이용객의 각기 다른 활동특성에 따른 노출 등을 고려하여 쾌적한 공기질을 유지할 수 있도록 관련연구가 필요한 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Fantuzzi, G., Figli, E., Predieri, G., Ceppelli, G., Gobba, F. and Aggazzotti, G. : Occupational exposure to trihalomethanes in indoor swimming pools. *The Science of the Total Environment*, **264**, 257-265, 2001.
2. Aggazzotti, G., Fantuzzi, G., Righi, E. and Predieri, G. : Environmental and biological monitoring of chloroform in indoor swimming pools. *Journal of Chromatography A*, **710**, 181-190, 1995.
3. WHO : Guidelines for safe recreational water environments Volume 2 - Swimming pools and similar environments. 2006.
4. Weaver, W. A., Li, J., Wen, Y., Johnston, J., Blatchley, M. R. and Blatchley, E. R. 3rd. : Volatile disinfection by-product analysis from chlorinated indoor swimming pools. *Water Research*, **43**(13), 3308-3318, 2009.
5. Lee, J., Ha, K.-T. and Zoh, K.-D. : The characteristics of THMs production by different disinfection methods in swimming pools water. *Korea Journal of Environmental Health*, **32**(2), 171-178, 2006.
6. Lee, M.-H. Jun, M.-J., Kim, H.-J. Eom, S.-W. and Choi, H.-Y. : Characteristics of byproducts from three different disinfection technologies applied to indoor swimming pool in seoul. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, **11**(4), 268-274, 2008.
7. Erdinger, L., Khn, K. P., Kirsch, F., Feldhues, R., Frbel, T., Nohynek, B. and Gabrio, T. : Pathways of trihalomethane uptake in swimming pools. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, **207**(6), 571-575, 2004.
8. Kim, M.-K., Park, Y.-S. and Chung, Y. : Studies on the quantitative analysis and the health effect of VOCs in environment - Analysis for THMs of tap water in six cities of Korea. *Analytical Science &*

- Technology*, **13**(1), 55-65, 2000.
9. Jeong, M.-S. and Lim, H.-T. : A study on environment awareness of quality of water in indoor swimming pools. *Korea Sport Research*, **12**(4), 249-260, 2001.
 10. Jo, W.-K. and Hwang, Y.-M. : Chloroform in the air of indoor swimming pools and the outdoor air near the swimming pools in a city of Korea. *Journal of the Korean Environmental Sciences Society*, **3**(3), 253-261, 1994.
 11. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH manual of analytical method 6011. Available from: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003%2D154/>. Accepted August 15, 1994.
 12. National Institute for Occupational Safety and Health. NIOSH manual of analytical method 1003, Available from: <http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003%2D154/>. Accepted March 15, 2003.
 13. Jeong, J.-Y., Shim, K.-J., Yi, G.-Y., Park, J.-S. and Jeong, H.-K. : Evaluation of chlorine exposure in a indoor swimming pool. *Health Hazard Evaluation Report*, 2000.
 14. ACGIH : 2010 TLVs and BEIs with 7th Edition Documentaion. 2010.
 15. Santa Marina, L., Ibarluzea, J., Basterrechea, M., Goi, F., Ulibarrena, E., Artieda, J. and Orruo, I. : Indoor air and bathing water pollution in indoor swimming pools in Guipzcoa (Spain). *Gaceta Sanitaria*, **23**(2), 115-120, 2009.
 16. Thiriart, N., Paulus, H., Le Bot, B. and Glorennec, P. : Exposure to inhaled THM: comparison of continuous and event-specific exposure assessment for epidemiologic purposes. *Environment International*, **35**(7), 1086-1089, 2009.
 17. Drobnic, F. A., Frexia, P., Casan, J. S. and Guardino, X. : Assessment of chlorine exposure in swimmer during training. *Medical Science Sports Exercise*, **28**(2), 271-274, 1996.
 18. WHO : Guidelines for safe recreational water environments Volume 2 - Swimming pools and similar environments. 2000.
 19. Lee, S. C., Guo, H., Lam, S. M. J. and Lau, S. L. A. : Multipathway risk assessment on disinfection by-products of drinking water in Hong Kong. *Environmental Research*, **94**, 47-56, 2004.
 20. Wang, W., Ye, B., Yang, L., Li, Y. and Wang, Y. : Risk assessment on disinfection by-products of drinking water of different water sources and disinfection processes. *Environment International*, **33**, 219-225, 2007.
 21. Panyakapo, M., Soontornchai, S. and Paopuree, P. : Cancer risk assessment from exposure to trihalomethanes in tap water and swimming pool water. *Journal of Environmental Sciences*, **20**, 372-378, 2008.
 22. Chowdhury, S. and Champagne, P. : Risk from exposure to trihalomethanes during shower -probabilistic assessment and control. *Science of the Total Environment*, **407**, 1570- 1578, 2009.
 23. Lee, J., Ha, K. T. and Zoh, K. D. : Characteristics of trihalomethane(THM) production and associated health risk assessment in swimming pool waters treated with different disinfection methods. *Science of the Total Environment*, **407**, 1990-1997, 2009.
 24. Chung, H. J. : A study on indoor air quality in traveler waiting room in Daejeon Area. *Korean Society of Environmental Administration*, **9**(2), 155-170, 2003.
 25. Park, J. G. and Yoon, J. W. : A hygienic evaluation of the indoor air quality in public used buildings. *Korean Society of Environmental Administration*, **9**(1), 49-56, 2003.
 26. Uyan, Z. S., Carraro, S., Piacentini, G. and Baraldi, E. : Swimming pool respiratory health and childhood asthma-should we change our beliefs. *Pediatric Pulmonology*, **44**, 31-37, 2009.
 27. USEPA. : Guidelines for carcinogen risk assessment. Risk assessment forum U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA/630/P/03/001F, 2005.
 28. Jang, J.-Y., Jo, S.-N., Kim, S., Kim, S.-J. and Cheong, H.-K. : Korean Exposure Factors Handbook, Ministry of Environment, Seoul, Korea, 2007.